

COTS 器件的空间辐射效应与对策分析

贾文远[1,2]，安军社[2]
（1．中国科学院大学，北京 100190；2．中国科学院国家空间科学中心，北京 100190）

摘要：空间辐射环境是影响 COTS(Commercial-off-the-shelf)器件的主要空间环境要素之一。通过分析空间辐射环境的主要来源，研究了空间辐射环境诱发的辐射效应，主要包括单粒子效应、总剂量效应、位移损伤效应等，提出了针对关键 COTS 器件的抗辐照的防护措施。

关键词：COTS 器件；空间辐射；综述；单粒子效应；总剂量效应；位移损伤效应；防护措施
doi: 10.14106/j.cnki.1001-2028.2015.11.001
中图分类号：TN609 文献标识码：A 文章编号：1001-2028（2015）11-0001-04

Analyze of space radiation effect and countermeasures of COTS components

JIA Wenyuan[1,2], AN Junshe[2]
(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. National Space Science Center of the Chinese Academy of Sciences Department of Space Technology, Beijing 100190, China)

Abstract: The space radiation environment is one of the main environment factors disturbing COTS components. The main source of the space radiation environment is analyzed. The space radiation effects caused by space radiation environment are researched, including single event effect, total ionizing dose, displacement damage effect and so on. Several of protective measures to protect main COTS components from the space radiation effect are mentioned in the last.

Key words: COTS components; space radiation; review; single event effect; total ionizing dose; displacement damage effect; protective measures

随着我国航天事业的发展，越来越多的电子元器件被用于航天器的组成部分。空间环境主要包括真空、中性、等离子体、辐射、微流星体和轨道碎片等环境。而这些空间环境能够引起航天器电子器件的损伤和故障，尤其辐射环境会带来严重的辐射效应。因此，本文主要对空间辐射环境进行分析，提高对航天器 COTS（Commercial-off-the-shelf，商用现成品或技术）器件的空间环境适应性的重视，减少航天器在轨运行时由辐射环境引起的故障。

1 COTS 器件的应用背景

按照电子器件质量的国际分类方法可分为：宇航级、883B 级、军级、工业级、商业级，而 COTS 器件一般是指大部分采用塑料封装的工业级或商业级的电子器件。在空间领域多使用宇航级电子器件，但是由于其生产周期长、批量小、价格昂贵，使高性能的 COTS 器件受到航天领域的广泛关注。

国外早在 20 世纪 70 年代就对 COTS 器件的应用展开了研究，对于微处理器、电源等器件进行抗辐照评估，并采取相应的加固措施。2013 年 ECSS 还发布了《商用器件 EEE 元器件空间产品保证》标准，保证用于空间项目的 EEE 元器件能够符合任务要求。而国内对于 COTS 器件的研究还处于初级阶段，得到的器件抗辐照资料比较落后，严重影响了我国对于 COTS 器件的选型和使用，大部分关键器件还是依赖国外进口，提高了航天任务的成本。

因此，在航天领域中，对 COTS 器件抗辐照性能进行评估，根据评估结果，使用高性能的 COTS

收稿日期：2015-07-10 通讯作者：安军社
作者简介：安军社（1969－），男，陕西富平人，研究员，博士，研究方向为空间飞行器综合电子系统；
贾文远（1989－），女，山东济宁人，研究生，主要研究方向为器件的航天应用试验研究，E-mail: jwy0820@163.com 。
网络出版时间：2015-10-29 14:50:26 网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1241.TN.20151029.1450.002.html

器件，减少对国外进口的依赖，缩短研制周期都具有十分重要的意义。

2 空间辐射环境对 COTS 器件的效应分析

2.1 空间辐射环境的来源

空间辐射环境的来源主要有地球辐射带、银河宇宙线、太阳质子事件等。

2.1.1 地球辐射带(VAB)

地球辐射带(VAB)又称范艾伦辐射带，是包围着地球的环状高能粒子辐射带，辐射粒子主要有电子和质子。如图 1 所示，地球辐射带包括内外两层，内辐射带离地面比较近，外辐射带离地面比较远。地球辐射带在地球磁层的一定磁纬度地区的上方，内外辐射带的主要成分、高度、磁纬度范围区别，如表 1 所示。地球辐射带内的带电粒子受到太阳风、宇宙线和高层大气相互作用而形成高能粒子，并在地球磁层的作用下不断辐射出电磁波，是电离辐射的主要来源之一。

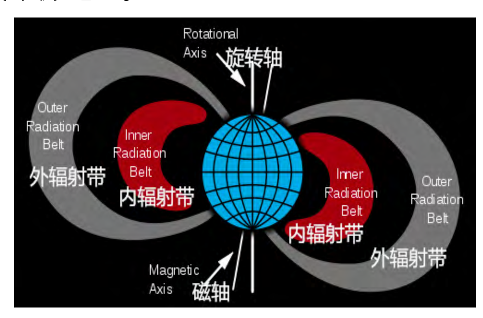


图 1 内外辐射带
Fig.1 Inner and outer radiation belts

表 1 内辐射带和外辐射带的区别
Tab.1 The difference of inner and outer radiation belts

	内辐射带	外辐射带
主要成分	捕获电子和质子，质子为主，电子能量为 0.04~7 MeV，质子能量约为 0.1~400 MeV	捕获电子和质子，电子为主，电子能量为 0.04~4 MeV，质子能量约为几个 MeV
高度	1~2 个地球半径之间	3~4 个地球半径之间
磁纬度范围/度	±40	±(50~60)
核心区高度/km	3 000	25 000

2.1.2 银河宇宙线（GCR）

银河宇宙线(GCR)是来自银河系的能量超过 10^{10} eV 的高能粒子流。银河宇宙线几乎包含了元素周期表中所有的元素，主要成分为质子、氦和重粒子。银河宇宙线的强度一般每 5 年和 11 年左右受太阳活动的影响。在活动高年，太阳风和行星际磁场都最强，银河宇宙线的辐射通量被极大地削弱，它的强度也就最低[1]。在活动低年，银河宇宙线的强度最高。在能量较低时，银河宇宙线具有较高的各向异性。除此之外，宇宙银河线还会和大气成分相互作用，产生次级宇宙线。

2.1.3 太阳质子事件（SPE）

除了太阳系外的银河宇宙线，太阳耀斑大爆发还会产生太阳宇宙射线[2]，产生大量高能粒子，又称为太阳质子事件（SPE）。太阳宇宙线主要成分为质子，还有 α 粒子和氦离子等。在太阳耀斑大爆发后的 1 h 内到达地球，且质子逐渐形成最大通量，质子强度可瞬间超过银河宇宙线正常值的 3~4 个数量级。这种高能质子到达地球会对飞船任务或卫星设备等造成很严重的辐射损伤。

2.2 空间辐射环境给 COTS 器件带来的主要效应

由以上分析可以得出，很多空间辐射环境因素都会对在轨航天器电子器件产生辐射损伤，其中主要的空间辐射效应包括电离总剂量效应（TID）、单粒子效应（SEE）、位移损伤效应（DD）、充放电效应和低剂量率敏感性增强效应（ELDRS）等。

表 2 主要辐射效应的辐射源和作用对象
Tab.2 The main radiation source of radiation effect and the objects acted on

辐射效应名称	引发效应的辐射源	效应的作用对象
单粒子翻转（SEU）	高能质子/重离子	逻辑器件、单/双稳态器件
单粒子闭锁（SEL）	高能质子/重离子	CMOS 器件
单粒子烧毁（SEB）	高能质子/重离子	功率 MOSFET
单粒子门断裂（SEGR）	高能质子/重离子	功率 MOSFET
总剂量效应(TID)	捕获电子/质子、耀斑质子	大部分电子器件及材料
位移损伤效应	捕获/耀斑、宇宙线质子	光电器件、太阳能电池
卫星表面充/放电	低能等离子体	卫星表面包覆材料、涂层
卫星内部带电	高能粒子	卫星内部材料、器件

2.2.1 总剂量效应(TID)

总剂量效应属于累积效应。半导体器件在空间辐照环境中，内部漏电流增加，运算放大器输入失调变大，导致材料内部损伤。如果半导体器件长时间处于空间辐射环境下，它的电流、电压门限值、转换时间等特性受到的辐照效应就会逐渐积累下来，导致性能漂移或者功能衰退，严重时可导致器件完全失效[5]。

2.2.2 单粒子效应

单粒子效应属于瞬态效应，它是指空间辐射环境下的单个高能粒子入射到半导体器件时产生高密度的电子空穴对，并被器件的反偏 PN 结所吸收，导致半导体器件的电路逻辑状态发射瞬态的扰动甚至永久性的损伤。最常见的单粒子效应有单粒子翻转（SEU）、单粒子锁定(SEL)等[3]。表 3 是不同单粒子效应的类型和定义描述。

表 3 不同单粒子效应类型
Tab.3 Different types of single event effect

类型		英文缩写	描述
瞬时	单粒子翻转	SEU	数字电路的逻辑状态发生改变
	单粒子瞬态脉冲	SET	单粒子暂态电流导致输出错误
	单粒子功能中断	SEFI	器件进入不执行设计功能的模式
	单粒子门扰动	SED	数字电路的逻辑状态发生瞬时扰动
永久性效应	单粒子闭锁	SEL	CMOS 器件的某个晶体管导通，电路短路并产生大电流
	单粒子烧毁	SEB	CMOS 器件的一种破坏性失效模式
	单粒子门断裂	SEGR	大电流使栅介质击穿
	单粒子位移损伤	SPDD	位移损伤带来的永久性的损伤
	单个位硬错误	SHE	单个位出现不可恢复的错误

在表 3 中，单粒子翻转和单粒子瞬态脉冲属于

软错误，可通过重新写入程序或断开电源恢复到原始状态。而单粒子位移损伤、单个位硬错误、单粒子烧毁、单粒子门断裂等属于硬错误，永久性效应[4]。

2.2.3　位移损伤效应

位移损伤效应是指高能粒子导致半导体器件内部的原子离开了原始晶格位置，使原始晶格位置成为空位，形成弗伦克尔缺陷（Frenkel defect），从而改变了原有的电学结构和性能。位移损伤主要对光电器件和少子器件影响较大，而对于 MOS 器件的影响较小。位移损伤效应的程度与辐射的强度、时间谱和能量谱的分布有关。

2.2.4　表面充放电和内部充放电（ESD）

当卫星浸入等离子体中时，大量的高速运动的电子和少量低速离子沉积在卫星表面，会形成辐射离子电流，同时在光照区中形成光电子电流，对器件材料的表面总电流产生影响。

3　COTS 器件抗辐射防护和加固措施

自 1957 年世界上第一颗人造地球卫星发射成功后，航天事业迅猛发展，至今已有通信卫星、气象卫星、侦察卫星、天文卫星等不同种类的卫星发射成功[6]。空间辐射环境是诱发航天器系统出现故障的主要因素之一，且居各故障因素之首。辐射环境中的单粒子效应、总剂量效应、位移损伤效应都会对 COTS 器件产生不同程度的损伤，导致航天器在轨运行出现故障。

3.1　空间辐射环境的故障案例分析

1989 年 3 月份太阳耀斑爆发导致很多卫星出现异常和故障。如欧空局地球同步轨道卫星（MARECS_1）在太阳大耀斑的影响下出现多次“开关事件”，日本地球同步轨道气象卫星(CMS-3B)的遥测信号发生强烈扰动，导致卫星丢失部分数据。1989 年 8~10 月份的特大太阳耀斑事件对 GOES-5、GOES-6、GOES-7 的太阳能电池造成损伤，输出参数发生错误。同时在此期间发生的两次太阳质子事件对 GOES-7 的太阳能电池也造成了严重性能损伤，大大降低了电池寿命[7]。

1991 年 7 月 17 日，欧洲 ESA 遥感卫星（ERS-1）在瞬态电流的影响下，在 SAA 附近高能质子引发卫星 PRARE 仪器的单粒子锁定效应，导致仪器发生故障。1993 年 11 月，美国极紫外探测卫星（EUVE）由于单粒子翻转效应，导致探测器窗口发生紧急关闭故障。自 1984 年以来，美国多个跟踪与数据中继卫星（TDRS）由于卫星指令处理器电子设备出现单粒子翻转效应，导致卫星产生不同程度的故障。

通过对表 4~5 的国内外近年来多颗卫星发生的故障分析后发现，在空间环境中，单粒子效应是诱发卫星故障的主要因素。各种空间环境效应之间还会产生耦合放大作用，如温度和真空效应会放大机械效应，机械效应会导致电效应、热效应、化学效应、表面充放电效应等。辐照效应会增加电效应、热效应、化学效应、表面充放电效应等。因此，为了确保航天器的安全运行，需要对航天器的电子器件进行空间环境适应性分析，并进行抗辐射加固。

表 4　国外卫星故障原因统计
Tab.4　The statistics of the failure causes of foreign satellites

故障类型	出现频度	故障百分率/%
电子诱发的电磁脉冲	293	18.44
静电放电	215	13.53
单粒子翻转	621	39.08
其他	460	28.95
总计	1589	100

表 5　国内地球精致轨道卫星故障原因统计
Tab.5　The statistics of the failure causes of domestic delicate earth satellites in orbit

故障原因	故障次数	故障百分率/%
设计和工艺原因	5	16.7
空间环境影响	12	40.0
元器件质量	5	16.7
其他未确定因素	8	26.6
总计	30	100

3.2　COTS 抗辐射防护总体思路

首先，应先对任务、产品进行空间辐射危害评估，主要包括任务总体的空间辐射及效应的分析和评估、分系统/单机的空间辐射危害分析评估、元器件的空间辐射危害评估和试验、单机（组件）的空间辐射危害试验。

其次，对产品进行空间辐射防护设计，规定任务总体的空间辐射防护设计指标、要求、规范，以及元器件的选用，还有产品的硬件软件的防护设计等。

在产品空间辐射防护设计后，还应对产品的空间辐射防护进行检验，包括空间辐射防护分析、模拟、试验，并对空间辐射防护进行评估和审查。

3.3　COTS 器件抗辐照测试试验

3.3.1　元器件选型

在选择元器件时首先应注意选择有质量体系保证的厂商生产的器件，尽量选择通用的产品型号并且尽量从商用或工业级、军品器件中选择，压缩器件种类，降低筛选的成本。其次，在器件选型时还可参考元器件的抗辐照 TID 等级，TID 等级越高，工艺越细致，抗辐照性能越好。在 COTS 器件的不断小型化、高性能的同时，封装技术也会对抗辐射性能产生影响[8]。在综合考虑加工工艺、封装水平、抗辐照 TID 指标后进行元器件选型。但是大部分元器件没有 TID 指标，只能依靠抗辐照试验来增强在元器件选型时的可靠性依据。

对已有的 NASA、ESA 的 COTS 器件试验数据进行分析，优选出已有数据的 COTS 器件，对存在风险的 COTS 器件进行高性能 COTS 器件的替换。本文主要对三个方面的 COTS 器件进行可用性评估（包括计算机最小系统、电源、部分射频器件等），如表 6 所示。

表 6 部分待测 COTS 器件型号及厂家
Tab.6 Parts types of COTS components under test and manufacturers

序号	名称	型号	厂家	主要功能
1	FLASH NOR	S29JL064J	Spansion	数据存储器和程序存储器
2	FLASH NAND	K9K8G08U0B	Samsung	数据存储器
3	MRAM	MR2A08A	EVERSPIN	数据存储器和程序存储器
4	POL	DVPL0503S	VPT	低压差电源转换
5	POL	ISL65426MREP	Intersil	低压差电源转换
6	译码器	CD74AC138M	TEXAS	地址译码
7	驱动器	SNJ54LVTH162245WD	TEXAS	地址、数据驱动
8	网口器件	DP83848MPHPEP	NSC	网口物理层收发器
9	ECL 电路		Microsemi	ECL 门电路
10	ARM	TMS570LS3137	TEXAS	微处理器
11	FPGA	A3P1000	Microsemi	FPGA

3.3.2 COTS 器件抗辐照试验

在经过元器件选型后，元器件使用前应对其进行抗辐照试验。主要有单粒子和总剂量两个试验。测试系统主要结构包括上位机、控制电路以及两块辐照板。测试试验主要通过搭建抗辐照试验平台，使用主控计算机来控制抗辐照测试板，完成主要器件的功能测试、电流监测、数据传输和处理测试等任务。抗辐照测试试验需模拟空间环境，选用重离子源或者回旋加速器作为单粒子辐射源，重离子（如 Co-g 射线）作为总剂量辐射源[9]。使用对照试验的方法，将待测器件开帽处理，暴露在辐射环境下；而对照组采用铅砖屏蔽处理，其他试验条件保持一致，同时改变辐射条件，记录并分析试验结果的变化。

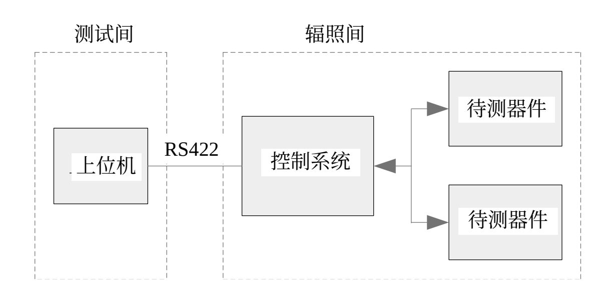


图 2 辐射效应测试系统的框架图
Fig.2 The frame of radiation effect test system

3.4 抗辐照加固

抗辐射加固可以在器件选型、原理设计、PCB 布局与设计、接口滤波和保护、部件和单机的冗余容错设计、FPGA 和 CPU 的软件设计等环节中进行，主要有工艺和设计两方面的加固技术，而工艺加固主要是制造厂商在元器件生产的过程中使用特殊工艺（如 SOI）进行流片处理，加到元器件的制造中达到抗辐射加固的设计目的[10]。因此，对于工艺加固来讲，只能在元器件选型时注意元器件抗辐照等级来提高抗辐射性能。

单粒子效应抗辐射加固设计主要采用看门狗、冗余设计以及对数字通信接口进行 EDAC(ECC）纠错校验等措施实现抗辐照加固；对器件进行限流设计，防止长时间过流导致单粒子烧毁效应（SEB）[11]。对航天器电子设备电路进行实时电流监视。当电流过大时及时断电防止单粒子闭锁效应（SEL），实现 SEL 加固。总剂量效应抗辐射加固设计主要考虑器件布局、局部器件加强屏蔽防护设计等。

4 结束语

主要分析了空间辐射环境下主要辐射效应的来源、原因以及现象。并结合实际的航天器故障案例分析，结合了具体的关键 COTS 器件，找出抗辐射防护和加固措施。单粒子效应和总剂量效应是空间辐射环境中影响航天器电子器件的主要因素。随着不断提高航天器部件的可靠性设计，并进行抗辐照加固等措施，可以有效降低单粒子和总剂量效应带来的危害。

参考文献：

[1] 高欣，杨生胜，牛小乐，等. 空间辐射环境与测量 [J]. 真空与低温, 2007, 13(1): 41-47.
[2] 王同权，沈永平，王尚武，等. 空间辐射环境中的辐射效应 [J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(4): 36-39.
[3] 丁义刚. 空间辐射环境单粒子效应研究[J]. 航天器环境工程，2007, 24(5): 283-290.
[4] 李毅. 星载计算机 COTS 技术下抗 SEL 辐射效应研究与实现 [D]. 北京: 国防科学技术大学, 2006: 18-20.
[5] 党炜. COTS 应用于空间辐射环境的可靠性研究 [D]. 北京: 中科院光电研究院, 2007: 31-33.
[6] 薛玉雄，杨生胜. 空间辐射环境诱发航天器故障或异常分析 [J]. 真空与低温, 2012, 18(2): 63-70.
[7] 冯伟泉. 归因于空间环境的航天器故障与异常 [J]. 航天器环境与工程, 2011, 28(4): 375-389.
[8] 唐宇，廖小雨，骆少明. 基于 CPU 和 DDR 芯片的 SiP 封装可靠性研究 [J]. 电子元件与材料, 2015, 34(4): 79-83.
[9] 何益百. 辐射效应地面试验技术研究 [D]. 北京: 国防科学技术大学, 2010: 34-37.
[10] 王健安，谢家志，赖凡. 微电子器件抗辐射加固技术发展研究 [J]. 微电子学, 2014, 44(2): 225-236.
[11] 王忠明. SRAM 型 FPGA 的单粒子效应评估技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011: 12-16.

（编辑：曾革）